

Петров П. А., *Зозуля Ф. С., Егоров Е. А., Петров М. П.

Донбасский государственный технический университет

**E-mail: Zotfer@mail.ru*

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОР СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

В работе представлен проект системы для подачи шлакообразующей смеси (ШОС) на поверхность жидкого металла в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ); приведено обоснование необходимости механизации и автоматизации изучаемого процесса; сформулированы основные требования, предъявляемые к проектируемым установкам; дан анализ существующих технических решений ведущих мировых и отечественных производителей машин для защиты зеркала металла от вторичного окисления; представлена методика расчета и определены основные технические параметры и конструкционные особенности установки механизированной подачи ШОС.

Ключевые слова: кристаллизатор, заготовка, шлакообразующая смесь, механизм подачи ШОС, механизм распределения ШОС, модель механизированной установки подачи ШОС.

В современном мире крупные металлургические компании, сталелитейные комбинаты и небольшие предприятия (минизаводы) постоянно совершенствуют технологии разливки стали и переходят на новое оборудование. Использование машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) связано с повышением производительности разливки стали и качества выпускаемой продукции.

Одним из обязательных условий для достижения необходимого качества литой заготовки является применение технологии защиты жидкого металла от окисления путем подачи на его поверхность шлакообразующей смеси (ШОС). Благодаря использованию специального состава ШОС уменьшается силовое взаимодействие между кристаллизатором и заготовкой, предотвращается повторное окисление металла и повышается равномерность отвода тепла от заготовки к стенкам кристаллизатора [1].

Существует ряд металлургических предприятий, на установках непрерывной разливки которых подача смеси в кристаллизатор МНЛЗ осуществляется вручную при помощи деревянного гребка, что не позволяет равномерно распределить смесь по поверхности жидкого металла в кристаллиза-

торе и требует наличия оператора непосредственно в зоне истечения жидкого металла из промежуточного ковша в кристаллизатор, а это отрицательно сказывается на безопасности труда обслуживающего персонала. Кроме того, влияние человеческого фактора может приводить к возникновению дефектов на поверхности отливаемой заготовки [2]. Альтернативой ручной подаче ШОС является механическая установка, способная увеличить точность дозирования и улучшить качество распределения подаваемой смеси в кристаллизатор.

Целью данной работы является разработка и обоснование основных конструктивных параметров системы для подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ.

Анализ литературных данных [3–6] позволил сформулировать основные требования, предъявляемые к установкам для подачи шлакообразующей смеси:

- возможность механизации и автоматизации работы установки подачи ШОС;
- блочно-модульная конструкция машины;
- режим парковки исполнительного механизма (либо всей установки) для облегчения доступа к кристаллизатору;

– возможность быстрой смены типа ШОС (использование как гранулированной, так и порошкообразной смеси).

Решение проблемы качественного распределения и подачи смеси можно разделить на несколько этапов.

Во-первых, это создание механизированной установки подачи ШОС, обладающей необходимыми физическими и кинематическими показателями, способной обеспечить все штатные варианты функционирования машины непрерывной разливки стали.

На следующем этапе требуется полная автоматизация процесса подачи смеси с использованием датчиков, позволяющих непрерывно получать данные основных технологических параметров установки, а также контроллеров расхода ШОС и траектории движения исполнительного механизма, путем обработки сигнала посредством специально разработанного программного обеспечения с целью поддержания оптимального режима поступления ШОС на поверхность жидкого металла в кристаллизаторе.

К основным достоинствам автоматизированной подачи ШОС следует отнести:

- регулирование в широких пределах объемного расхода ШОС в кристаллизатор;
- возможность подачи смеси сразу на несколько ручьев;
- снижение расхода ШОС до 15 % в зависимости от типа установки [7].

Существующие системы подачи ШОС, представленные зарубежными компаниями и отечественными производителями, можно разделить на два основных типа: пневматические и механические (табл. 1).

На рынке существуют коммерческие предложения от проектно-конструкторских бюро и научно-исследовательских компаний, занимающихся подобными разработками; в частности, интерес представляет французская компания Imerys [8]. Пневматическая система, выпускаемая данной фирмой, состоит из стационарных бункеров с установленным внутри ножом для резки пакетов, устройства взвешивания и

распределения смеси по ручьям МНЛЗ и системы подачи смеси, снабженной насадками. В свою очередь, установка российской фирмы Ekos [9] отличается компактностью, поскольку бункер и дозирующая система установлены в одном корпусе. Система рассчитана на работу с несколькими типами ШОС. Характерным решением подачи ШОС сжатым воздухом является система MAC-G350 Automatic Mold Powder Feeding Machine, разработанная китайской компанией Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. [10], отличительной особенностью которой является система с совмещенными бункерами. Одновременно объединяющим элементом и дозирующей системой является шнековый механизм, расположенный под бункерами. Помимо пневматической системы компания Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. выпускает механический аналог — установку MAC-G320 Automatic Mold Powder Feeding Machine [11]. В качестве базы она использует тележку с расположенным на ней бункером и двумя шнековыми дозаторами, которые одновременно распределяют смесь по обе стороны кристаллизатора.

На металлургических предприятиях нашего региона одними из первых разрабатывать и внедрять подобные системы начали сотрудники кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии» ФГБОУ ВО «ДонНТУ» [12, 13]. Отличительной особенностью опытно-промышленных образцов, разработанных на кафедре МОЗЧМ, является работа установок подачи ШОС с несколькими типами смесей, простота конструкции и экономия расхода смеси по сравнению с аналогами.

В свою очередь, сотрудники кафедры машин металлургического комплекса ФГБОУ ВО «ДонНТУ» в тесном взаимодействии с донецкими коллегами продолжают активно вести разработки в указанном направлении. К исследовательской работе были подключены магистранты и аспиранты кафедр вуза (Зозуля Федор, Егоров Егор, Мамсуй Руслан, Нижегородов Даниил, Муленко Лео-

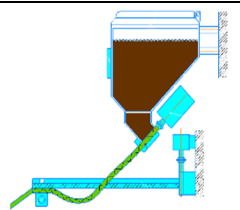
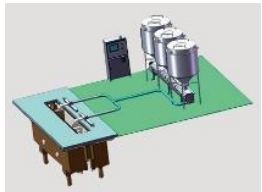
МАШИНОСТРОЕНИЕ

нид, Петров Максим), чему в определенной мере способствовало их участие в федеральном проекте «Платформа университетского технологического предпринимательства» в рамках межвузовской акселерационной

программы поддержки проектных команд и студенческих инициатив «Акселератор БГТУ им. В. Г. Шухова». По итогам конкурса команда ДонГТУ вышла в финал и выиграла призовое место.

Таблица 1

Сравнение систем подачи ШОС отечественных и зарубежных производителей

Авторы проекта (компания разработчик)	Возможность работы с различными типами ШОС	Управляемая площадь покрытия ШОС	Режим парковки	Блочно-модульная конструкция	Схема установки
Проект команды Gambit (ДонГТУ)	Да	Да	Да	Да	
Кафедра МОЗЧМ ФГБОУ ВО «ДонНТУ»	Да	Да	Да	Нет	
Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd.	Да	Да	Да	Нет	
Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd.	Нет	Нет	Нет	Нет	
Ekos	Да	Да	Нет	Нет	
Imerys	Да	Нет	Нет	Нет	

Дальнейшее развитие проекта потребовало уточнения технического задания и более тесной коммуникации членов команды со специалистами металлургического комбината. После посещения предприятия и общения с представителями отделения непрерывной разливки стали кислородно-конвертерного цеха ООО «ЮГМК» был выдвинут ряд дополнительных требований к конструкции системы подачи ШОС, которые заключались в наличии бункера увеличенного объема, особенностях крепления исполнительного механизма к раме тележки промежуточного ковша, а также в раздельном исполнении бункера и механизма подачи ШОС. Кроме того, имеются определенные проблемы с механизацией процесса замены сталеразливочных стаканов промежуточного ковша [14].

В итоге с учетом опыта проектирования подобных установок и пожеланий эксплуатационного персонала ООО «ЮГМК» был разработан проект установки подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (рис. 1), в

большей мере удовлетворяющий вышеперечисленным требованиям.

Установка состоит из бункера ШОС 1, электромагнитного встряхивателя 2, мотор-редуктора 3 с регулируемой частотой вращения выходного вала, приводящего в движение гибкий шнековый дозатор 5, поворотной консоли 6 с приводом 4, который обеспечивает равномерное движение консоли вдоль широкой стенки кристаллизатора. Дозирующая система оснащена подающим носком 8, позиционирование которого осуществляется посредством пневмопривода 7.

Система работает по следующему принципу. ШОС из бункера 1 подается к зеркалу металла в кристаллизаторе по гибкому металлорукаву, внутри которого вращается спиральный шнек 5, приводимый во вращение мотор-редуктором 3. На разгрузочном участке гибкого шнекового дозатора 5 закреплен подающий носок 8. Требуемый расход смеси регулируется посредством изменения частоты вращения приводного вала. Во избежание слеживания смеси в бункере 1 имеется электромагнитный встряхиватель 2.

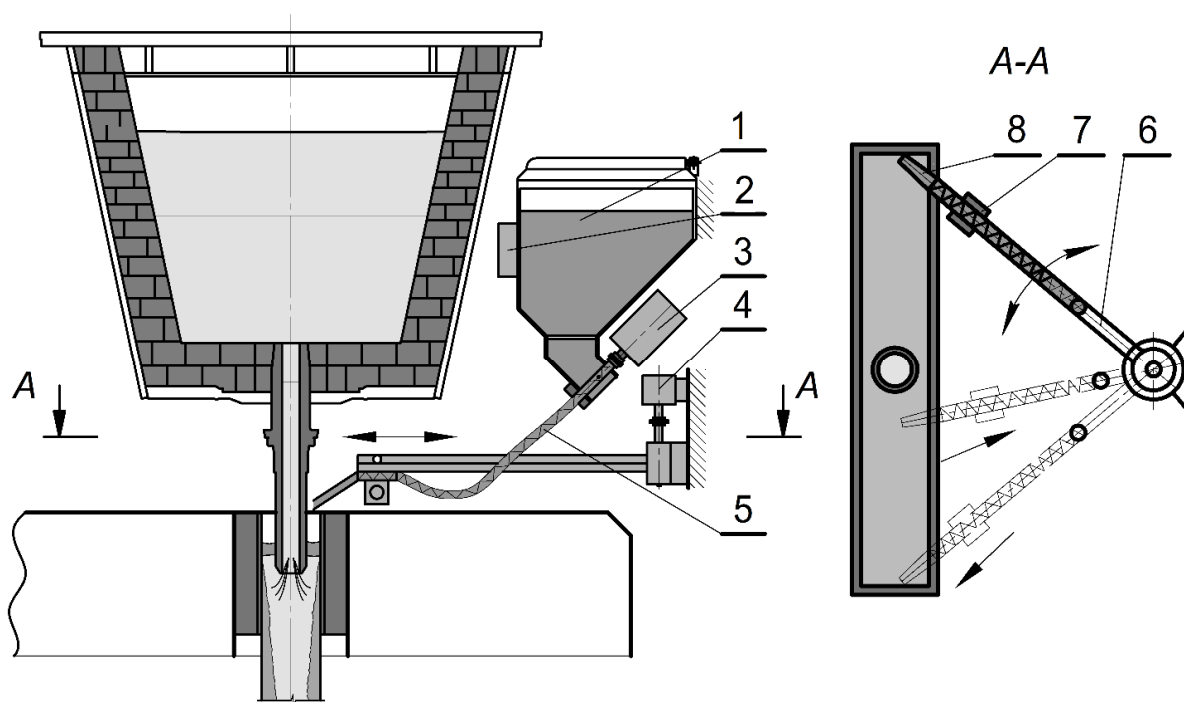


Рисунок 1 — Установка подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ

Качественное распределение ШОС, поступающей из подающего носка 8 к зеркалу жидкого металла в кристаллизаторе, реализовано посредством механизма поворота консоли 6 (механизм, отвечающий за распределение смеси). Конструктивной особенностью является переменная длина консоли 6, которая обеспечивается путем ее выдвижения приводом 7. Удлинение консоли необходимо для равномерного распределения смеси как в центре кристаллизатора, так и по его периферии.

Движение консоли 6, а также ее парковку обеспечивает привод 4, который задает необходимую скоростью поворота консоли относительно ее оси вращения. Поддержание постоянной линейной скорости движения рабочего органа (носка) вдоль широкой стенки кристаллизатора регулируется контроллером, синхронизирующим скорость движения подающего носка 8 с углом, скоростью поворота и удлинением консоли 6.

Разработка новой конструкции и определение основных параметров проектируемой установки механизированной подачи шлакообразующей смеси к зеркалу жидкого металла в кристаллизаторе основывались на выборе исходных данных, применительно к условиям двухручьевого слябового МНЛЗ кислородно-конвертерного цеха ООО «ЮГМК».

Мощность, необходимая для вращения гибкого шнека механизма подачи ШОС, определяется выражением

$$N_1 = k_{np} \cdot \frac{M_1 \cdot \omega_{ш}}{\eta}, \quad (1)$$

где M_1 — момент сопротивления вращению шнека; η — КПД механизма вращения шнека; $\omega_{ш}$ — угловая скорость вращения шнека; k_{np} — коэффициент запаса мощности двигателя для преодоления перегрузок, $k_{np} = 1,2 \div 1,3$ [15].

Частота вращения шнека, согласно данным [16], может изменяться в диапазоне $n_{ш}$ 300...400 об/мин.

При вращении гибкого шнека его витки своей наружной кромкой сдвигают слой мел-

кодисперсного материала вдоль внутренней поверхности гибкого трубопровода, в результате чего на кромку действует сила F_{cd} , значение которой пропорционально площади сдвигаемого слоя S_{cd} и напряжению сдвига транспортируемой шлакообразующей смеси τ_{cd} [17]:

$$F_{cd} = S_{cd} \cdot \tau_{cd}. \quad (2)$$

Ввиду отсутствия в открытых источниках данных о механических свойствах различных типов ШОС определение τ_{cd} может вызывать определенные трудности. С учетом того, что шлакообразующая смесь по физическим характеристикам напоминает песок, в расчетах принимаем усредненное значение напряжения сдвига транспортируемой смеси $\tau_{cd} = 3$ кПа [18].

Момент сопротивления вращению шнека:

$$M_1 = F_{cd} \cdot \mu \cdot D_{ш} / 2, \quad (3)$$

где $D_{ш}$ — наружный диаметр витков шнека; μ — коэффициент трения поверхности витка шнека о шлакообразующую смесь (согласно данным [19], коэффициент внешнего трения $\mu = 0,32 \div 0,8$).

Для достижения требуемого расхода смеси необходим гибкий шнек с определенным диаметром $D_{ш}$ и шагом витков, способный транспортировать заданное количество смеси.

В работе [16] представлены зависимости объемной подачи Q_v шнека за один оборот спирали от конструктивных параметров транспортирующего устройства, для гибких шнеков с соотношениями диаметра трубопровода D_p , диаметра $D_{ш}$ и шага s витков спирали, составляющими (в мм): $D_p/D_{ш} = (25/18; 20/16; 15/11)$ и $s/D_{ш} = (0,5; 0,7; 1)$. С целью получения аналитических зависимостей $Q_v = f(D_p/D_{ш}, s/D_{ш})$ в области $D_{ш} > 40$ мм была создана аддитивная модель с выбранными весовыми коэффициентами (рис. 2), построенная на основании полученных по данным [16] регрессионных зависимостей.

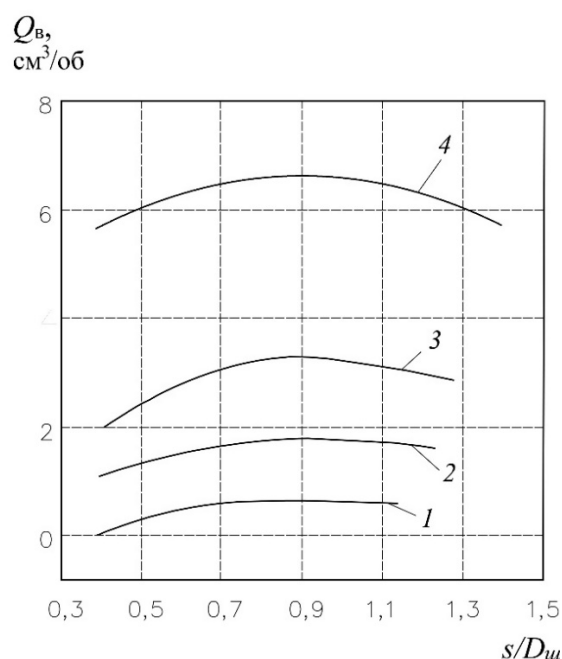


Рисунок 2 — Изменение объемной подачи шнека Q_v от конструктивных параметров транспортирующего устройства при D_p/D_u : 1 — 15/11; 2 — 20/16; 3 — 25/18; 4 — 45/40

Расход смеси за один оборот витка шнека ($\text{см}^3/\text{об}$) вычисляется по формуле

$$Q_v = \frac{Q}{(60 \cdot n_u)} \quad (4)$$

С учетом того, что объемный расход смеси ($\text{см}^3/\text{ч}$):

$$Q = q_{см} \frac{10^6}{\gamma_c}, \quad (5)$$

где γ_c — насыпная плотность шлакообразующей смеси $\gamma_c = 550 \div 650 \text{ кг/м}^3$ [1];

$q_{см}$ — расход ШОС (кг/ч).

Задавшись отношением $D_p/D_u = 45/40$ и $s/D_u = 0,9$, что соответствует максимальному расходу $Q_v = 6,6 \text{ см}^3/\text{об}$ (рис. 2), можно определить расход $q_{см}$:

$$q_{см} = \frac{60 Q_v}{10^6} n_u \gamma_c \quad (6)$$

Таким образом, на основании полученной аддитивной модели, задавшись параметрами гибкого шнека, можно получить расход ШОС $q_{см}$, который следует сопоставить с регламентируемыми значениями расхода ШОС [$q_{см}$]. Например, для слябовой МНЛЗ с производительностью до 2,6 млн тонн в год среднечасовой расход смеси (с учетом рекомендаций расхода ШОС на тонну разливаемой стали $0,3 \div 0,6 \text{ кг/т}$ [20]) составит [$q_{см}$] = $89 \div 178 \text{ кг/ч}$.

Полученная в ходе расчета мощность двигателя вращения гибкого шнека механизма подачи ШОС сопоставима с энергосиловыми параметрами привода аналогичных установок (табл. 2).

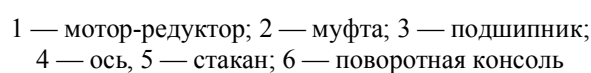
На рисунке 4 приведена расчетная схема механизма поворота консоли, являющегося частью механизма распределения смеси, состоящего из: привода 1, от которого крутящий момент через муфту 2 передается к вертикальной оси 4, установленной в двух подшипниковых опорах 3, которые закреплены в неподвижном корпусе 5. Зафиксированная на оси 4 поворотная консоль 6 оборудована приводом ее удлинения, посредством которого реализуется радиальное перемещение подающего носка.

Таблица 2

Энергетические показатели привода подачи ШОС различных установок

Проект команды Gambit (ДонГТУ)	Установка для обслуживания блоумовой МНЛЗ [17]	Усовершенствованная система дозированной подачи ШОС в кристаллизатор слябовой МНЛЗ [5]	Система дозированной подачи ШОС в кристаллизатор слябовой МНЛЗ для отливки заготовок сверхкрупного сечения [21]
103 Вт	150 Вт	300 Вт*	500 Вт*

*Фактическая мощность, необходимая для вращения одного шнека составила 150–200 Вт, так как для вращения шнека использовался привод, одновременно вращающий несколько шнеков (либо шнек и ворошитель).



 траектория движения подающего носка (нормальный режим);
 вариант возможной траектории движения подающего носка,
соответствующий режиму локальной подачи ШОС

Мощность привода, необходимая для поворота консоли:

где M_{mp} — момент трения в подшипниковых опорах оси поворота консоли;

k_3 — коэффициент запаса мощности двигателя для преодоления перегрузок, $k_3 = 1,3$;

w — угловая скорость;

η — КПД привода.

Угловая скорость:

$$\omega = \frac{v}{\left(k + \frac{H}{2}\right)}, \quad (8)$$

где H — максимальная толщина отливаемого слитка;

k — расстояние от оси поворота консоли до фиксированной стенки кристаллизатора (рис. 4);

v — скорость поступательного движения носка относительно широкой стенки кристаллизатора.

Момент трения в подшипниках:

$$M_{тр} = R \cdot f \cdot \frac{d}{2}, \quad (9)$$

где d — диаметр трения в подшипнике;

R — радиальная нагрузка на подшипник;

f — коэффициент трения для шарикоподшипников [22].

Закрепленное на консоли оборудование весом Q , относительно оси будет создавать момент, уравновешиваемый парой сил в подшипниках. При этом реакция R в опоре подшипника составит:

$$R = \frac{Q \cdot l_{max}}{h}, \quad (10)$$

где h — длина оси; l_{max} — максимальная длина поворотной консоли.

Особенность новой конструкции системы автоматической подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ состоит в применении телескопического механизма установки носка на поворотной консоли механизма распределения ШОС. Максимальное удлинение консоли равно Δ_{max} (рис. 4). В начальном положении, соответствующем крайнему выдвиганию консоли, ее длина максимальна и равна l_{max} . При движении поворотной консоли совместно с распределительным носком вдоль широкой стенки кристаллиза-

тора из крайнего левого положения (позиция a на рис. 4) ($\varphi_i = -\varphi_{max}$) в крайнее правое положение ($\varphi_i = +\varphi_{max}$) (позиция z на рис. 4) производится подача и распределение ШОС. При постепенном повороте консоли от периферии к центру кристаллизатора (произвольное положение — рис. 4, поз. b) ее удлинение будет находиться в пределах $\Delta_0 < \Delta_i < \Delta_{max}$. В центральном положении (рис. 4, поз. $в$) консоль имеет минимальное удлинение Δ_0 . А поскольку в центре кристаллизатора находится погружной сталеразливочный стакан, подающий носок постепенно задвигается и консоль укорачивается до размера l_{min} .

Максимальный угол φ_{max} отклонения консоли от центрального положения:

$$\varphi_{max} = \arctan\left(\frac{B}{2k + H}\right), \quad (11)$$

где B — максимальная ширина отливаемого слитка.

Для описания траектории движения носка относительно широкой стенки кристаллизатора было получено выражение, определяющее текущую длину консоли l_i (рис. 4) в зависимости от угла φ_i поворота консоли ($-\varphi_{max} < \varphi_i < \varphi_{max}$) и от размеров сечения ($H \times B$) отливаемого слитка:

$$l_i = \sqrt{x^2 + y^2} = y \sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi_i + 1}, \quad (12)$$

где $y = (k + H/2)$ — расстояние от оси поворота консоли до оси x_1-x_1 .

Откуда легко определить требуемое удлинение консоли Δ_i в зависимости от угла поворота φ_i :

$$\Delta_i = y \sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi_i + 1} - l_{min}. \quad (13)$$

Таким образом, были обоснованы и получены основные конструкционные параметры разработанной системы механизированной подачи ШОС. Техническая характеристика механизмов проектируемой установки представлена в таблице 3.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 3

Техническая характеристика механизма подачи и распределения ШОС проектируемой установки

Наименование параметра	Значение
Механизм вращения гибкого шнека	
Сила $F_{сд}$, Н	605,76
Момент сопротивления вращению гибкого шнека, Нм	7,47
Мощность привода, Вт	103,94
Угловая скорость вращения гибкого шнека, c^{-1}	10,02
Наружный диаметр витков гибкого шнека, мм	40
Шаг витков, мм	40
Расход ШОС $q_{см}$, кг/ч	103
Механизм распределения смеси	
Мощность привода, Вт	0,501
Угловая скорость, c^{-1}	0,104
Момент трения в подшипниках, Нм	2,76
Реакция в опоре подшипников, кН	5,52
Максимальная/минимальная длина консоли, мм	1,625/1,24
Угол поворота консоли $-\varphi_{max}/+\varphi_{max}$	$\pm 54,3^\circ$

В результате проведенного анализа систем подачи ШОС отечественных и зарубежных производителей с учетом практических рекомендаций и производственного опыта эксплуатации подобных машин разработан проект установки для слябовой МНЛЗ, соответствующий современным требованиям механизации и автоматизации процесса подачи ШОС к зеркалу жидкого металла в кристаллизаторе.

Также предложена аддитивная модель объемной подачи шнека Q_v в зависимости от конструктивных параметров транспортирующего устройства.

Полученные данные расчетной мощности привода и траектории движения консоли будут использованы для построения натурной модели и проведения дополнительных исследований.

Список источников

1. Вдовин К. Н., Точилкин В. В., Ячиков И. М. *Непрерывная разливка сталей : монография.* 3-е изд., стер. СПб. : Лань, 2023. 732 с. EDN MXLUVU
2. Ботников С. А. *Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла.* 2-е изд. Волгоград, 2011. 97 с.
3. Новые системы дозированной подачи порошкообразных и гранулированных шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // *Металлургические процессы и оборудование.* 2009. № 2 (16). С. 34–38. EDN NVXFJN
4. Еронько С. П. Усовершенствованная система дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор слябовой МНЛЗ // *Металлургические процессы и оборудование.* 2013. № 4 (34). С. 74–81. EDN RQQHKK
5. Еронько С. П., Ющенко М. В. *Высокоэффективная система дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор слябовой МНЛЗ // Инновационные перспективы Донбасса : материалы международной научно-практической конференции, Донецк, 20–22 мая 2015 года.* Донецк : ДонНТУ, 2015. Т. 3. С. 32–37. EDN SSIUYP
6. Ганин Д. Р., Лицин К. В., Шевченко Е. А. Обзор и анализ устройств для подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* 2018. № 1 (1417). С. 58–65. EDN YSCZOO

7. Еронько С. П., Цыхмистро Е. С., Назаренко В. В. Проектирование систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ // Материалы научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов по направлению «Машиноведение» : материалы ВУЗовской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Посвящается 100-летию ДонНТУ, Донецк, 11 июня 2020 года. Донецк : ДонНТУ, 2020. С. 20–23. EDN DHNOQF
8. Mold Flux Feeders [Electronic resource] // Imerys : [website]. [2019]. URL: <http://castmysteel.de/mold-flux-feeders/>.
9. Автоматическая система подачи ШОС [Электронный ресурс] // Ekos : [сайт]. [2022]. URL: <https://ekos.com.ru/uslugi/mashina-dlya-podachi-shos/>.
10. MAC-G350 Automatic Mold Powder Feeding Machine [Electronic resource] // Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. : [website]. [2022]. URL: <https://whzfy18.com/productinfo/861025.html>.
11. MAC-G320 Automatic Mold Powder Feeding Machine [Electronic resource] // Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. : [website]. [2022]. URL: <https://whzfy18.com/productinfo/861024.html>.
12. Опыт проектирования и промышленного применения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы слывовых МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Металлург. 2020. № 3. С. 51–57. EDN WEBOZB
13. Опыт разработки и внедрения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // Черная металлургия : Бюл. ин-та «Черметинформация». 2020. Т. 76. № 10. С. 994–1003. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-10-994-1003. EDN PAOYAH
14. Еронько С. П., Ошовская Е. В., Петров П. А., Петров М. П. Модельная проверка функционирования разработанной системы быстрой смены погружных стаканов при непрерывном литье слывовой заготовки // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сборник тезисов докладов VIII международной научно-технической конференции (23–24 октября 2024 г.) / под общ. ред. В. Н. Сишдова. Алчевск : ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 2024. С. 181–184. EDN FOXKUB
15. Кузьмин А. В., Марон Ф. Л. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. 2-е изд., перераб. и доп. Мн. : Вышэйш. шк., 1983. 350 с.
16. Экспериментальные исследования рабочих параметров спиральных шнеков для подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, М. В. Юценко, Б. И. Стародубцев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 9. С. 33–40. DOI: 10.20535/S0021347014040037. EDN SQTAXN
17. Расчет и конструирование системы механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор блюмовой МНЛЗ / С. П. Еронько, Е. С. Цыхмистро, П. А. Петров, Ф. С. Зозуля // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 24 (67). С. 91–98. EDN AQHWRC
18. Крамаренко В. В. Грунтоведение : учебное пособие. Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2011. 472 с.
19. Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах : учебное пособие / И. В. Горюшинский [и др.] ; под общ. ред. И. В. Горюшинского. Самара : СамГАПС, 2003. 232 с.
20. Шаповалов А. Н. Теория и технология разлики стали : учебное пособие. Новотроицк : НФ НИТУ «МИСИС», 2024. 128 с.
21. Физическое моделирование технических систем сталеплавильного производства : учебное пособие / С. П. Еронько [и др.]. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 324 с.
22. Справочник-каталог / под ред. В. Н. Нарышкина и Р. В. Коросташевского. М. : Машиностроение, 1984. 280 с.

© Петров П. А., Зозуля Ф. С., Егоров Е. А., Петров М. П., 2025

Рекомендована к печати

*д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ им. В. Я. Седуша ДонНТУ Еронько С. П.,
к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М.*

Статья поступила в редакцию 30.05.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Зозуля Федор Сергеевич, аспирант каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: Zotfer@mail.ru

Егоров Егор Александрович, магистрант каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Петров Максим Павлович, магистрант каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Petrov P. A., *Zozulya F. S., Egorov E. A., Petrov M. P. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: Zotfer@mail.ru)

DEVELOPMENT OF SYSTEM DESIGN FOR FEEDING THE SLAG-FORMING MIXTURE INTO SLAB CCM CRYSTALLIZER

The paper provides the system design for feeding the slag-forming mixture (SFM) onto the surface of liquid metal in a continuous casting machine (CCM) crystallizer; the necessity of mechanizing and automating the process under study is justified; the basic requirements for the designed units have been formulated; the existing technical solutions of the leading world and domestic manufacturers of machines for protecting metal mirror from secondary oxidation are analyzed; the calculation methodology is given and the main technical parameters and design features of the mechanized SFM feeder are determined.

Key words: crystallizer, blank, slag-forming mixture, mechanism for feeding the slag-forming mixture, mechanism for distributing the slag-forming mixture, model of the mechanized unit for feeding the slag-forming mixture.

References

1. Vdovin K. N., Tochilkin V. V., Yachikov I. M. Continuous steel casting : a monograph [Nepreryvnaya razlivka stalej : monografiya]. 3 ed., stereotype. SPb. : Lan', 2023. 732 p. EDN MXLUVU
2. Botnikov S. A. Modern atlas of defects in continuous cast billets and the causes of breakthroughs in crystallizing metal crusts [Sovremennyy atlas defektov nepreryvnolitoj zagotovki i prichiny vozniknoveniya proryvov kristallizuyushchejsya korochki metalla]. 2 ed. Volgograd, 2011. 97 p.
3. Yeronko S. P. [et al.]. New systems for dosed feeding of powdered and granulated slag-forming mixtures into CCM crystallizers [Novye sistemy dozirovannoj podachi poroshkoobraznyh i granulirovannyh shlakoobrazuyushchih smesej v kristallizatory MNLZ]. Metallurgical processes and equipment. 2009. No. 2 (16). Pp. 34–38. EDN NVXFNJ
4. Yeronko S. P. Improved system of dosed feeding of slag-forming mixtures into the slab CCM crystallizer [Uovershenstvovannaya sistema dozirovannoj podachi shlakoobrazuyushchih smesej v kristallizator slyabovoj MNLZ]. Metallurgical processes and equipment. 2013. No. 4 (34). Pp. 74–81. EDN RQQHKX
5. Yeronko S. P., Yushchenko M. V. Highly efficient system of dosed feeding of slag-forming mixtures into the slab CCM crystallizer [Vysokoeffektivnaya sistema dozirovannoj podachi shlakoobrazuyushchih

smesey v kristallizator slyabovoy MNLZ]. *Innovacionnye perspektivy Donbassa : materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Donetsk : DonNTU, 2015. Vol. 3. Pp. 32–37. EDN SSIUYP

6. Ganin D. R., Licin K. V., Shevchenko E. A. Review and analysis of devices for feeding slag-forming mixtures into the crystallizers of continuous casting machines [Obzor i analiz ustroystv dlya podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок]. *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2018. No. 1 (1417). Pp. 58–65.

7. Yeronko S. P., Cyhmistro E. S., Nazarenko V. V. Design of systems for mechanized supply of slag-forming mixtures to CCM crystallizers [Proektirovanie sistem mekhanizirovannoy podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизаторы MNLZ]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenykh, aspirantov i studentov po napravleniyu "Mashinovedenie" : materialy VUZovskoy nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenykh, aspirantov i studentov. Posvyashchaetsya 100-letiyu DonNTU*. Donetsk : DonNTU, 2020. Pp. 20–23. EDN DHNOQF

8. Mold Flux Feeders. Imerys. 2019. URL: <http://castmysteel.de/mold-flux-feeders/>.

9. Automated SFM Feeding System [Avtomaticheskaya sistema podachi SHOS]. Ekos. 2022. URL: <https://ekos.com.ru/uslugi/mashina-dlya-podachi-shos/>

10. MAC-G350 Automatic Mold Powder Feeding Machine. Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. 2022. URL: <https://whzfy18.com/productinfo/861025.html>.

11. MAC-G320 Automatic Mold Powder Feeding Machine. Wuhan CenterRise M&C Engineering Co., Ltd. 2022. URL: <https://whzfy18.com/productinfo/861024.html>.

12. Yeronko S. P. [et al.]. Experience in design and industrial application of systems for mechanized feeding of slag-forming mixtures into the slab CCM crystallizers [Opyt proektirovaniya i promyshlennogo primeneniya sistem mekhanizirovannoy podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизаторы slyabovykh MNLZ]. *Metallurg*. 2020. No. 3. Pp. 51–57. EDN WEBOZB

13. Yeronko S. P. [et al.]. Experience in development and model testing of mechanized feeding of slag-forming mixture to the CCM crystallizer [Opyt razrabotki i vnedreniya sistem mekhanizirovannoy podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизаторы MNLZ]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of the Institute "Chermetinformatsiya"*. 2020. Vol. 76. No. 10. Pp. 994–1003. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-10-994-1003. EDN PAOYAH

14. Yeronko S. P., Oshovskaya E. V., Petrov P. A., Petrov M. P. Model test of the developed system for the fast change of submerged nozzles in continuous slab casting [Model'naya proverka funkcionirovaniya razrabotannoy sistemy bystroj smeny pogruznykh stakanov pri nepreryvnom lit'e slyabovoy zagotovki]. *Puti sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh processov i oborudovaniya promyshlennogo proizvodstva : sbornik tezisev dokladov VIII mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Endorsed by Siidov V. N. Alchevsk : FSBEI HE "DonSTU", 2024. Pp. 181–184. EDN FOXKUB

15. Kuz'min A. V., Maron F. L. A reference book on calculations of mechanisms of hoisting and transporting machines [Spravochnik po raschetam mekhanizmov pod'emno-transportnykh mashin]. 2 ed., repr. and add. Mn. : Vysheysya shkola, 1983. 350 p.

16. Yeronko S. P., Oshovskaya E. V., Yushchenko M. V., Starodubcev B. I. Experimental studies of operating parameters of spiral screws for feeding slag-forming mixtures into CCM crystallizers [Eksperimental'nye issledovaniya rabochnykh parametrov spiral'nykh shnekov dlya podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизаторы MNLZ]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2014. Vol. 57. No. 9. Pp. 33–40. DOI: 10.20535/S0021347014040037. EDN SQTAXN

17. Yeronko S. P., Cyhmistro E. S., Petrov P. A., Zozulya F. S. Calculation and design of the system of mechanized feeding of slag-forming mixtures into the bloom CCM crystallizer [Raschet i konstruirovaniye sistem mekhanizirovannoy podachi shlaкообразующих смесей в кристаллизатор blyumovoy MNLZ]. *Collection of Scientific Papers of DonSTI*. 2021. Iss. 24 (67). Pp. 91–98. EDN AQHWRC

18. Kramarenko V. V. Soil science: study letter [Gruntovedenie : uchebnoe posobie]. Tomsk : Publishing house of the Tomsk Polytechnic University. 2011. 472 p.

19. Goriushinskiy I. V. [et al.]. Bulk solids tanks in transport and cargo systems : textbook [Emkosti dlia sypuchikh gruzov v transportno-gruzovykh sistemakh : uchebnoe posobie]. Endorsed by Goriushinskiy I. V. Samara : SamGUPS, 2003. 232 p.

20. Shapovalov A. N. *Theory and technology of steel casting : textbook [Teoriia i tekhnologiya razlivki stali : uchebnoe posobie]*. Novotroitsk : NF NUST "MISIS", 2024. 128 p.

21. Yeronko S. P. [et al.]. *Physical modelling of steelmaking technical systems : textbook [Fizicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem staleplavilnogo proizvodstva : uchebnoe posobie]*. M. : Infra-Inzheneriia, 2021. 324 p.

22. *Handbook-catalogue [Spravochnik-katalog]*. Eds. Naryshkin V. N. and Korostashevskiy R. V. M. : Mashinostroenie, 1984. 280 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Pavel Aleksandrovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Zozulya Fyodor Sergeievich, Postgraduate of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: Zotfer@mail.ru

Egorov Egor Aleksandrovich, Candidate for a Master's Degree of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Petrov Maxim Pavlovich, Candidate for a Master's Degree of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia